第65卷 第6期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 6
2024年11月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Nov., 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.06.011

太空风化对硅酸盐小行星反射光谱的影响*

张沁葳[1,2] 张鹏飞[3] 王鹏越[4] 姜 特[5] 卢 瑜[1] 韩慧杰[4] 庞荣华[3] 李 阳[3] 张 昊[5] 金 岩[6] 吴昀昭[1,4†]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(3 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550081)
(4 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室 澳门 999078)
(5 中国地质大学行星科学研究所 武汉 430074)
(6 国家航天局对地观测与数据中心 北京 100101)

摘要 太空风化研究对小行星表面环境及成分遥感反演具有重要意义. 目前对太空风化引起小行星光谱变化的研究结果并不统一, 对硅酸盐小行星风化模式缺乏统一的认识. 基于大样本研究的思路, 统计了4颗普通球粒陨石(H、L和LL型)、7种硅酸盐单矿物、6组橄榄石-辉石不同比例混合物的激光辐照实验, 分析辐照前后样品可见-近红外反射光谱(0.45–2.5 μm)的变化, 并结合小行星光谱研究太空风化对硅酸盐小行星光谱的影响. 结果显示, 太空风化不会引起1 μm吸收中心的明显偏移, 但会导致吸收面积比(2 μm带面积/1 μm带面积)增加. 因此, 使用"1 μm吸收中心–吸收面积比"作图来区分陨石类型仍然有效, 即太空风化对矿物学分类影响较小. 在主成分分析图中, A型小行星具有几乎平行于α线的风化趋势, 其余硅酸盐小行星具有"Q-Sq-S"的风化趋势. 基于斯隆数字巡天数据(Sloan Digital Sky Survey dataset, SDSS)的小行星分类系统会混淆富含橄榄石小行星的分类, 并可能低估A型小行星的数量. 系统分析了硅酸盐小行星太空风化模式及光谱变化规律, 对深入认识小行星光谱的太空风化效应以及矿物定量遥感反演具有实用价值.

关键词 行星和卫星: 表面, 月球, 小行星: 普通
中图分类号: P185; **文献标识码**: A

1 引言

作为行星吸积的残骸, 小行星保留了太阳系早期环境的丰富信息. 研究不同成分小行星在太阳系的分布对于认识太阳系物质分布、演化、迁移至关重要[1–3]. 由于太阳光能量主要集中在可见-近红外波段, 且构成小行星的硅酸盐矿物在可见-近红外波段大多具有吸收特征, 因此, 可见-近红外反射光谱成为表征小行星物质成分的重要手段. 目前, 国际上已经开展了多次小行星光谱巡天任务[3–8], 积累了海量的小行星可见-近红外反射光谱数据. 基于对这些光谱曲线的反射率、斜率、吸收位置等参数的分析, 研究人员建立了小行星光谱分类系统[9–14]. 此外, 陨石与小行星反射光谱的比较研究, 促进了"陨石-小行星对应关系" (Meteorite-Asteroid Links)的建立[15–16], 实验室陨石学研究因此能被应

2023-11-09收到原稿, 2023-12-19收到修改稿
*国家国防科技工业局空间碎片与小行星专项(KJSP2023020105)资助
†wu@pmo.ac.cn

用到观测的小行星上, 从而更好地认识物质在太阳系的分布. 例如, S-complex (包含Q、S、Sa、Sq、Sr、Sv型)和V型小行星具有硅酸盐(如橄榄石、辉石)成分, 分别对应普通球粒陨石与HED陨石[16].

小行星长期暴露在宇宙空间中, 受到微陨石撞击、宇宙和太阳高能射线辐照等作用, 表面的物质会经历破碎、胶结、溅射、沉积等物理过程, 化学组分、物理特征及光谱特征都会相应发生改变, 这些过程统称为"太空风化" (space weathering)[17–18]. 太空风化被认为是小行星光谱与陨石实验室光谱存在差异的主要原因, 阻碍了对小行星物质成分和演化历史的理解. 早期基于月球的研究表明, 太空风化会导致反射率降低(变暗), 吸收变弱, 可见-近红外光谱斜率增加(变红), 即"月球模式"[17, 19–20]. 随后, 对S型小行星Itokawa的探测进一步支撑了"月球模式"的观点[21–23]. 然而, 近年来对(4) Vesta、(162173) Ryugu和(101955) Bennu等小行星的探测[24–26]以及实验室对碳质陨石的模拟研究[27–31]都表明: 小行星的太空风化模式并不统一, 与小行星的初始物质和风化程度密切相关[31]. 周婷等[32]概述了太空风化对C型小行星的光谱影响, 发现太空风化对C型小行星物质的改造机理不明确, 导致光谱效应存在争论. 此外, 嫦娥三号原位探测光谱数据显示, 太空风化对光谱的影响具有波长依赖性: 可见-近红外连续统光谱斜率(visible and near-infrared continuum slope, VNCS)增加, 而可见光波段(延伸至紫外波段)光谱斜率减小(即"变蓝")[33]. 进一步, 基于对陨石的模拟实验和小行星光谱数据分析, 太空风化改变小行星光谱类型的观点陆续被提出. 大量研究揭示了从代表新鲜物质的Q型小行星向代表成熟物质的S型小行星演化的趋势[3, 31]. 这有助于识别表面具有不同太空风化年龄的普通球粒陨石母体, 为了解其演化历史提供线索. Lantz等[28]系统地讨论了碳质小行星光谱类型的演化趋势, 并提出(101955) Bennu表面可能经历了从C型小行星向B型小行星的转变. Hasegawa等[34]通过望远镜观测对比了(596) Scheila撞击事件前后光谱, 证实了D型小行星向T型小行星的演化趋势. 未来有望通过更深入的研究, 发现更多可能存在的由太空风化引起的光谱类型演化.

目前太空风化模拟实验主要包括两种: 用离子注入模拟太阳风高能粒子辐射以及用激光辐照模拟微陨石撞击. 通过对两种模拟实验对比发现, 太阳风辐照引起光谱显著变化的时间尺度约为10^4–10^6 yr, 而微陨石撞击影响的时间尺度约为10^8–10^9 yr[35–36]. 同时, 太阳风粒子辐射的影响主要在天体表面最上层(< 1 μm)[37], 辐射深度很浅, 而微陨石撞击会对较深层物质成分产生影响. 因此, 太阳风辐射可能在内太阳系占主导地位, 而在主带小行星中微陨石撞击可能作为主要贡献[37]. 本文研究的太空风化过程主要是基于脉冲激光的微陨石撞击过程, 以期理解太空风化对小行星表面的长期光谱改造.

近地和内主带小行星的主要类型是硅酸盐小行星(如S型和Q型)[3]. 尽管关于太空风化的研究已经非常丰富, 目前对于硅酸盐小行星太空风化的光谱学研究还有两个关键的科学问题没有解决. 第一, 太空风化是否会改变硅酸盐小行星在可见-近红外波段的吸收位置, 如何改变? 第二, 太空风化如何改变小行星的光谱类型? 这两个问题对于推断小行星的物质成分以及演化都至关重要. 因此, 本文基于大量陨石、单矿物和矿物混合物的脉冲激光辐照实验数据, 分析了太空风化对多种样品光谱参数的影响. 在此基础上, 本文进一步将样品光谱与小行星光谱类型进行了对比, 以期理解太空风化对硅酸盐小行星反射光谱的影响, 为小行星光谱数据的解译和定量反演提供基础支撑.

2 数据和方法

2.1 辐照实验数据收集

鉴于通过单一或少量样本研究太空风化对光谱影响的代表性不足, 本研究对大量实验样本的光谱数据进行分析, 以获得普适结论. 本文共收集了17个激光辐照实验的反射光谱数据, 样本包括4颗普通球粒陨石(H、L和LL型)、7种硅酸盐单矿物、6组橄榄石-辉石不同比例混合物. 部分光谱数据来自Reflectance Experiment Laboratory (RELAB)光谱数据库, 其余来自一些已发表文献. 所收集

激光辐照实验参数、样品信息、数据来源见表1. 由于部分实验使用了来自相同产地的不同样品, 本文对同产地样品进行标号以便区分(如San Carlos olivine 1#和2#). 所有样品辐照前后的反射光谱数据均采集自0.45–2.5 μm范围. 样品辐照前后的反射光谱见图1.

表 1 激光辐照实验信息

Table 1 Laser irradiation experimental information

Sample	Irradiation parameters[a]	Sample status	References
Meteorites			
Xingyang (H6)	28 mJ * 10	Fresh fragments	[31]
Kheneg Ljouad (LL5/6)	28 mJ * 10	Fresh fragments	[31]
Appley Bridge (LL6)	20 mJ, 20 mJ * 2	Chip	RELAB
Chateau Renard (L6)	20 mJ, 20 mJ * 2, 20 mJ * 3, 20 mJ * 4	Chip	RELAB
Minerals			
Green olivine	15 mJ, 15 mJ * 2	Pellets 45–75 μm	RELAB
San Carlos olivine 1#	15 mJ	Particulate	RELAB
San Carlos olivine 2#	30 mJ, 30 mJ * 5, 30 mJ * 10	Pressed powder < 75 μm	[38]
San Carlos olivine 3#	15 mJ * 20	Pressed powder < 160 μm	[39]
Bamble orthopyroxene 1#	15 mJ * 20	Pressed powder < 160 μm	[39]
Bamble orthopyroxene 2#	43 J/cm^2	Pressed powder ∼200 μm	[40]
Clinopyroxene	57 J/cm^2	Pressed powder ∼200 μm	[40]
Mineral mixture[b]			
EN	50 mJ * 2	Grain size < 75 μm	[41]
OL1EN4	50 mJ * 2	Grain size < 75 μm	[41]
OL2EN3	50 mJ * 2	Grain size < 75 μm	[41]
OL3EN2	50 mJ * 2	Grain size < 75 μm	[41]
OL4EN1	50 mJ * 2	Grain size < 75 μm	[41]
OLV	50 mJ * 2	Grain size < 75 μm	[41]

[a] Note that some samples underwent different irradiated energies and times.

[b] Mixed minerals at different proportions (wt.%) of olivine and pyroxene, where EN represents enstatite and OL represents olivine. For example, OL1EN4 represents a mixture of 80 wt.% pyroxene and 20 wt.% olivine.

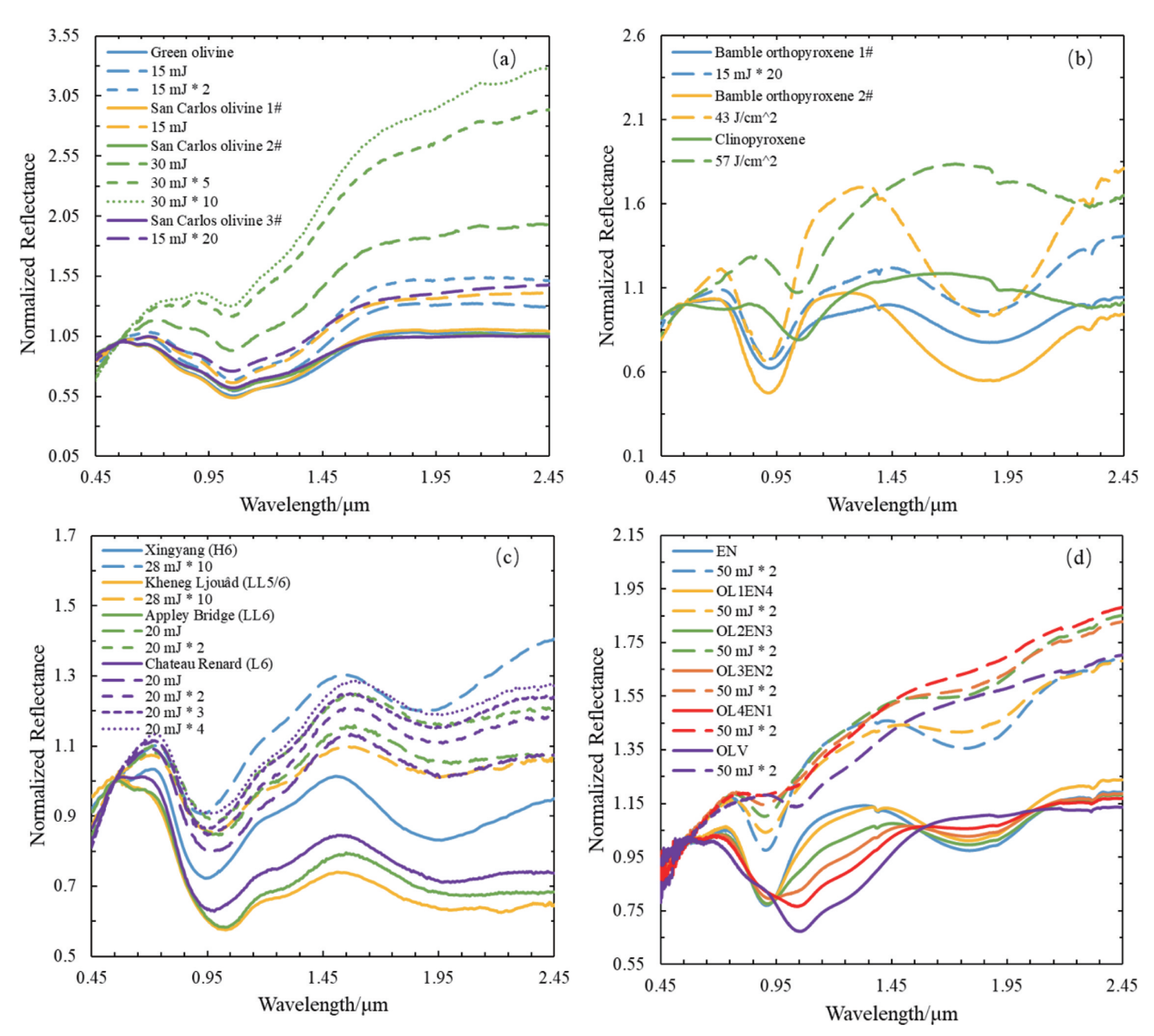


图 1　样品激光辐照前后反射光谱图. (a)–(d)样品分别为橄榄石、辉石、普通球粒陨石和矿物混合物(所有数据均在0.55 μm处归一化).

Fig. 1　Reflectance spectra of samples before and after laser irradiation. (a)–(d) samples are olivine, pyroxene, ordinary chondrites and mineral mixtures (all data are normalized at 0.55 μm).

2.2　光谱参数分析

由于反射率是衡量太空风化作用的一个重要指标, 本研究首先统计了辐照前后所有样品在0.55 μm处的绝对反射率($R_{0.55}$, 样品反射光线强度/标准白板反射强度). 由于历史原因小行星观测数据均在0.55 μm处进行了归一化, 为了更好比较样品与小行星数据, 本文对所有收集的样品光谱数据也在0.55 μm处进行了归一化, 即将所有波长处的反射率值除以0.55 μm处的反射率值, 获得归一化反射率(Normalized Reflectance). 随后, 本文计算了辐照前后光谱数据在1 μm处可见-近红外连续统斜率(Slope). 同时分析了辐照前后1 μm吸收中

心(Band 1 Center, BC1)和2 μm吸收中心(Band 2 Center, BC2), 1 μm波段面积(Band 1 Area, BA1)和2 μm波段面积(Band 2 Area, BA2)以及吸收面积比(Band Area Ratio, BAR, 定义为BA2/BA1). 具体计算方法参见Wu等[33]与Lindsay等[42].

此外, 本文进一步利用两种小行星分类方法对辐照前后的光谱数据进行分析. (1)采用麻省理工学院开发的小行星光谱分类工具计算光谱数据的第一主成分(PC1′)和第二主成分(PC2′). 该工具基于Bus-Demeo分类法而开发, 详细内容见DeMeo等[13]. (2)使用斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey dataset, SDSS)任务所采用的小行星分类体系对辐照前后的光谱数据进行计算. 该方法采用g′ (0.4686 μm)、r′ (0.6166 μm)、i′ (0.7480 μm)波段的斜率(gri-slope)和i′ (0.7480 μm)、z′ (0.8932 μm)波段的色指数(z′-i′ color)对小行星进行分类, 具体计算方法参见DeMeo等[1]和Nesvorny等[43].

3 结果

3.1 样品光谱参数的变化

表2列出了样品激光辐照前后光谱参数结果, 表3列出了样品辐照前后光谱参数的变化.

表 2 激光辐照前后所有样品的光谱参数

Table 2 Spectral parameters of all samples before and after laser irradiation

Sample	Irradiation parameters	$R_{0.55}$	Slope/μm^{-1}	BC1/μm	BC2^{a}/μm	BA1	BA2^{a}	BAR^{a}
Meteorites								
Xingyang (H6)	unirradiated	0.17	−0.032	0.946	1.928	112.098	84.562	0.754
	28 mJ * 10	0.10	0.255	0.942	1.913	76.076	58.807	0.773
Kheneg Ljouad (LL5/6)	unirradiated	0.19	−0.027	0.993	1.969	159.624	48.307	0.303
	28 mJ * 10	0.11	0.297	0.981	1.944	83.440	28.354	0.340
Appley Bridge (LL6)	unirradiated	0.27	−0.069	0.995	1.965	160.268	38.746	0.242
	20 mJ	0.15	0.085	0.990	1.950	95.141	25.161	0.264
	20 mJ * 2	0.14	0.170	0.990	1.950	91.115	24.941	0.274
Chateau Renard (L6)	unirradiated	0.28	−0.074	0.960	1.945	144.551	42.814	0.296
	20 mJ	0.19	0.044	0.975	1.955	119.196	34.850	0.292
	20 mJ * 2	0.18	0.109	0.970	1.930	108.128	30.363	0.281
	20 mJ * 3	0.16	0.155	0.960	1.930	101.944	28.644	0.281
	20 mJ * 4	0.15	0.179	0.970	1.935	98.511	28.895	0.293
Minerals								
Green olivine	unirradiated	0.73	0.054	1.085	–	276.561	–	–
	15 mJ	0.58	0.241	1.085	–	263.726	–	–
	15 mJ * 2	0.49	0.383	1.085	–	236.941	–	–
San Carlos olivine 1#	unirradiated	0.78	0.071	1.070	–	275.890	–	–
	15 mJ	0.56	0.284	1.075	–	210.467	–	–

表 2 续

Table 2 Continued

Sample	Irradiation parameters	$R_{0.55}$	Slope/μm^{-1}	BC1/μm	BC2[a]/μm	BA1	BA2[a]	BAR[a]
Minerals								
San Carlos olivine 2#	unirradiated	0.80	0.030	1.074	–	226.027	–	–
	30 mJ	0.42	0.639	1.076	–	159.103	–	–
	30 mJ * 5	0.27	1.452	1.072	–	86.665	–	–
	30 mJ * 10	0.24	1.677	1.072	–	84.122	–	–
San Carlos olivine 3#	unirradiated	0.42	0.029	1.066	–	210.429	–	–
	15 mJ * 20	0.27	0.302	1.074	–	174.556	–	–
Bamble orthopyroxene 1#	unirradiated	0.30	−0.048	0.917	1.864	108.186	114.082	1.054
	15 mJ * 20	0.21	0.170	0.918	1.865	104.881	125.127	1.193
Bamble orthopyroxene 2#	unirradiated	0.64	0.076	0.914	1.834	127.981	267.525	2.090
	43 J/cm^2	0.32	0.874	0.916	1.844	115.468	257.110	2.227
Clinopyroxene	unirradiated	0.73	0.177	1.050	2.284	81.394	140.974	1.723
	57 J/cm^2	0.44	0.692	1.050	2.296	58.178	108.909	1.872
Mineral mixture								
EN	unirradiated	0.61	0.158	0.912	1.777	57.550	74.943	1.302
	50 mJ * 2	0.40	0.513	0.914	1.792	39.078	55.268	1.414
OL1EN4	unirradiated	0.60	0.110	0.912	1.792	64.609	62.412	0.966
	50 mJ * 2	0.36	0.420	0.914	1.812	29.490	29.441	0.998
OL2EN3	unirradiated	0.65	0.054	0.916	1.805	71.899	44.412	0.618
	50 mJ * 2	0.29	0.509	0.915	1.809	27.818	21.498	0.773
OL3EN2	unirradiated	0.70	0.040	0.931	1.824	92.767	26.512	0.286
	50 mJ * 2	0.25	0.476	0.923	1.808	26.740	11.413	0.427
OL4EN1	unirradiated	0.73	0.037	1.037	1.824	117.143	13.127	0.112
	50 mJ * 2	0.24	0.505	1.041	1.824	27.968	4.664	0.167
OLV	unirradiated	0.78	0.080	1.062	–	176.968	–	–
	50 mJ * 2	0.24	0.405	1.054	–	22.753	–	–

[a] "–" indicates no data (olivine lacks 2 μm absorption).

表 3 激光辐照前后所有样品光谱参数变化

Table 3 Changes in spectral parameters of all samples before and after laser irradiation

Sample	Irradiation parameters	$\triangle R_{0.55}$[a]	$\triangle$Slope[b] /μm^{-1}	$\triangle$BC1[c] /μm	$\triangle$BC2[d] /μm	$\triangle$BAR[e]
Meteorites						
Xingyang (H6)	28 mJ * 10	−0.07	0.287	−0.004	−0.015	0.019
Kheneg Ljouad (LL5/6)	28 mJ * 10	−0.08	0.324	−0.012	−0.025	0.037
Appley Bridge (LL6)	20 mJ	−0.12	0.154	−0.005	−0.015	0.022
	20 mJ * 2	−0.13	0.239	−0.005	−0.015	0.032
Chateau Renard (L6)	20 mJ	−0.09	0.118	0.015	0.010	−0.004
	20 mJ * 2	−0.10	0.183	0.010	−0.015	−0.015
	20 mJ * 3	−0.12	0.229	0	−0.015	−0.015
	20 mJ * 4	−0.13	0.253	0.010	−0.010	−0.003
Minerals						
Green olivine	15 mJ	−0.17	0.187	0	–	–
	15 mJ * 2	−0.24	0.329	0	–	–
San Carlos olivine 1#	15 mJ	−0.22	0.213	0.005	–	–
	30 mJ	−0.38	0.609	0.002	–	–
San Carlos olivine 2#	30 mJ * 5	−0.53	1.422	−0.002	–	–
	30 mJ * 10	−0.56	1.647	−0.002	–	–
San Carlos olivine 3#	15 mJ * 20	−0.15	0.273	0.008	–	–
Bamble orthopyroxene 1#	15 mJ * 20	−0.09	0.218	0.001	0.001	0.139
Bamble orthopyroxene 2#	43 J/cm^2	−0.32	0.798	0.002	0.010	0.137
Clinopyroxene	57 J/cm^2	−0.29	0.515	0	0.012	0.149
Mineral mixture						
EN	50 mJ * 2	−0.21	0.355	0.002	0.015	0.112
OL1EN4	50 mJ * 2	−0.24	0.310	0.002	0.020	0.032
OL2EN3	50 mJ * 2	−0.36	0.455	−0.001	0.004	0.155
OL3EN2	50 mJ * 2	−0.45	0.436	−0.008	−0.016	0.141
OL4EN1	50 mJ * 2	−0.49	0.468	0.004	0	0.055
OLV	50 mJ * 2	−0.54	0.325	−0.008	–	–

[a] $\triangle R_{0.55}$ is the difference between $R_{0.55}$ of the irradiated sample and the unirradiated sample.

[b] △Slope is the difference between Slope of the irradiated sample and the unirradiated sample.

[c] △BC1 is the difference between BC1 of the irradiated sample and the unirradiated sample.

[d] △BC2 is the difference between BC2 of the irradiated sample and the unirradiated sample, "–" indicates no data (olivine lacks 2 μm absorption).

[e] △BAR is the difference between BAR of the irradiated sample and the unirradiated sample, "–" indicates no data (olivine lacks 2 μm absorption).

由表3可见, 所有样品的$\triangle R_{0.55}$均为负值且△Slope均为正值, 表明激光辐照实验降低反射率的同时增加了1 μm处可见-近红外连续统斜率, 即"变暗"和"变红". 同一样品多次辐照的光谱图(图1)、$\triangle R_{0.55}$、△Slope (表3)表明, "变暗"与"变红"均随太空风化程度增加. 在同样激光能量下, "橄榄石-辉石混合体系"的变暗程度随橄榄石比例增加而增大, 而变红程度未呈现出明显规律. 激光辐照后, 1 μm和2 μm吸收中心未呈现出系统变化(即统一向短波或长波方向偏移), 但几乎所有样品的BAR在辐照后均增大.

图2展示了辐照前后1 μm波段中心随吸收面积比的变化. "1 μm吸收中心–吸收面积比"成图方法能够有效地分离不同类型的硅酸盐陨石[44]. 两颗LL型球粒陨石样品辐照后向L 型球粒陨石靠近, L型球粒陨石辐照后则向LL型球粒陨石靠近, 二者逐渐向两类陨石分界线靠拢, 但未完全突破该分界线(图2). 因此基于本文的样品表明太空风化对矿物学分类影响较小, 使用"1 μm吸收中心–吸收面积比"成图法区分不同类型陨石依然较为有效, 未来更大样本的实验数据可验证此结论的正确性.

图3展示了样品辐照前后1 μm吸收位置处的可见-近红外连续统斜率随吸收面积比的变化. 除纯辉石样品外, 其余所有样品模拟风化的箭头方向均由普通球粒陨石区域指向小行星区域, 表明硅酸盐小行星普遍存在着太空风化光谱变红效应.

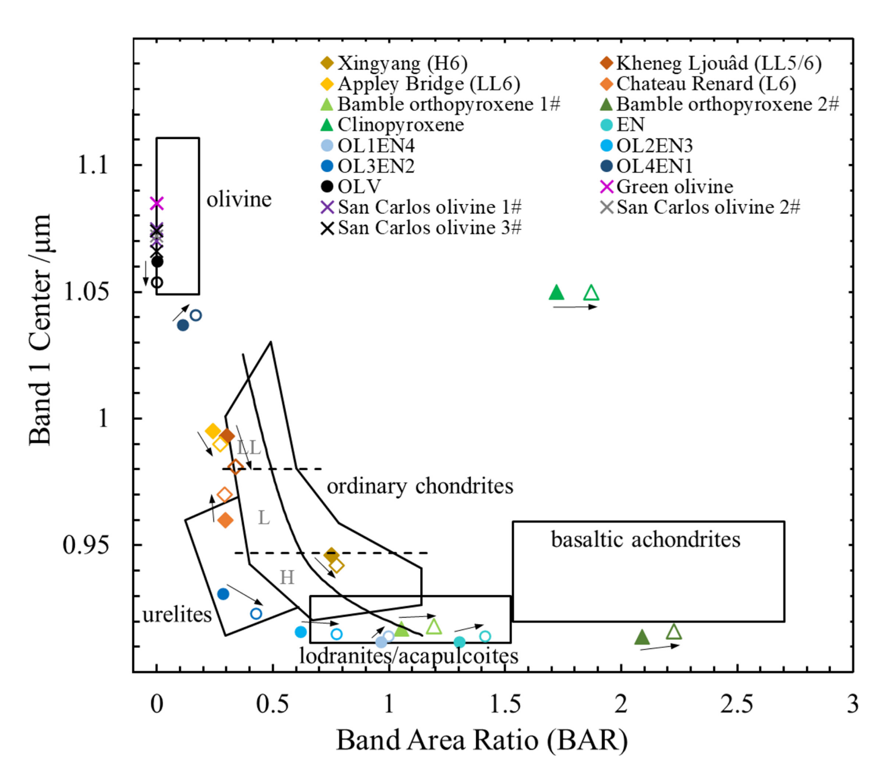


图 2 1 μm吸收中心与吸收面积比. 实心点为辐照前数据, 空心点为辐照后数据(多次辐照的样品取累计能量最高的数据), 箭头方向为模拟太空风化的效果趋势方向.

Fig. 2 1 μm absorption center versus Band Area Ratio (BAR). The solid symbols are the data before irradiation, the open symbols are the data after irradiation (for samples with multiple irradiations, the data with the highest cumulative energy is taken), and the arrows indicate the trend direction of simulating space weathering effects.

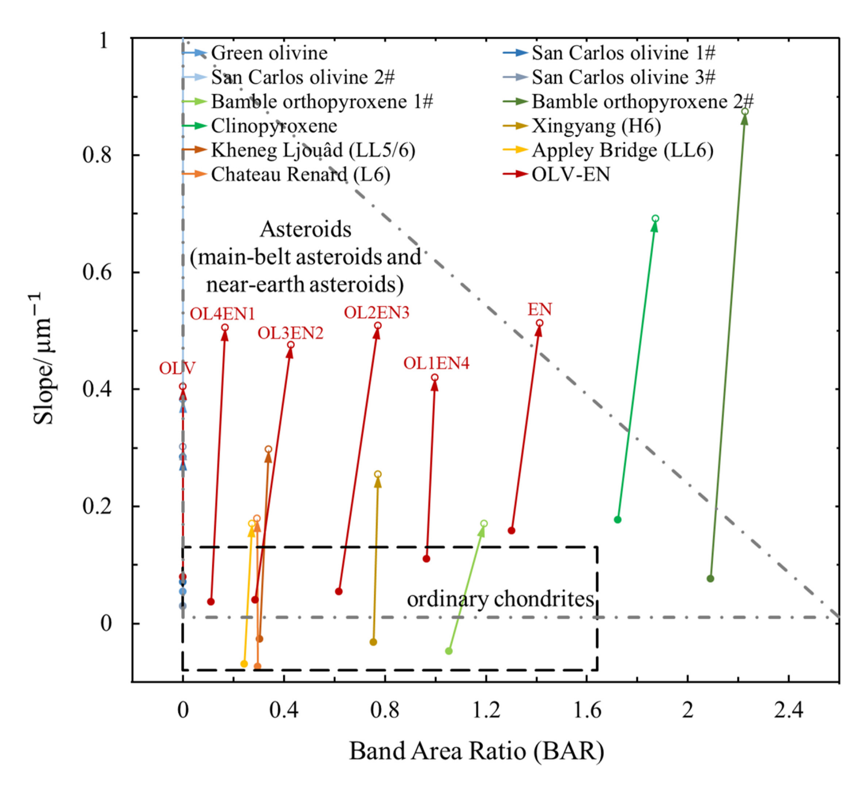


图 3 1 μm吸收位置处的可见-近红外连续统斜率与吸收面积比. 黑色虚线包围的矩形区域包含95%的普通球粒陨石数据, 灰色虚线包围的三角形区域由主带和近地小行星数据定义[45]. 实心点为辐照前数据, 空心点为辐照后数据(多次辐照的样品取累计能量最高的数据), 箭头方向为模拟太空风化的效果趋势方向. OLV-EN为6组橄榄石-辉石混合物样品数据.

Fig. 3 Visible to near-infrared continuum spectral slope at 1 μm absorption band versus band area ratio. The rectangular area (black dashed lines) is defined by data of 95% of ordinary chondrites, the triangular area (gray dashed lines) is defined by data of the main belt and near-Earth asteroids[45], the solid symbols are the data before irradiation, the open symbols are the data after irradiation (for samples with multiple irradiations, the data with the highest cumulative energy is taken), and the arrows indicate the trend direction of simulating space weathering effects. OLV-EN consists of six sets of olivine-pyroxene mixture samples.

3.2 陨石与小行星太空风化对比

基于Bus-DeMeo分类法对光谱数据处理得到的太空风化趋势结果如图4所示. 其中α线为区分光谱有无2 μm吸收的分界线, α线左侧代表缺乏2 μm吸收, 右侧代表具有2 μm吸收[13]. 辐照前后的纯橄榄石样品数据均位于α线左侧, 当辉石加入时, PC2′值增加, 使数据点移动到α线的右侧. 新鲜橄榄石数据点集中在A型小行星区域, 其太空风化趋势箭头均与α线平行, 并指向PC1′增加且PC2′减小的方向. “橄榄石-辉石混合体系”辐照前数据点主要集中在Q型小行星区域. 图中黑色虚线箭头指示混合矿物新鲜样品的分布趋势, 橄榄石与辉石的矿物含量对它们在主成分分析图中的位置有着明显的控制作用, 随着辉石含量的增加, PC1′与PC2′值均增加, 同时太空风化趋势箭头与α线夹角逐渐增大. LL型球粒陨石(通常更富橄榄石)与H型球粒陨石(通常更富辉石)数据也表现出相似趋势. 混合矿物与陨石的太空风化趋势箭头均呈现“Q-Sq-S”的风化趋势. 值得注意的是OL4EN1样品的太空风化趋势箭头跨越了α线. 斜方辉石数据点更靠近V型小行星区域, 这是由于V型小行星表面更富辉石[24]. 但4个辉石的太空风化方向也有一定差异性: 样品Clinopyroxene和EN辐照后PC1′增加且PC2′明显减小, 而Bamble orthopyroxene 1#和Bamble orthopyroxene 2#辐照后PC1′增加但PC2′变化不明显.

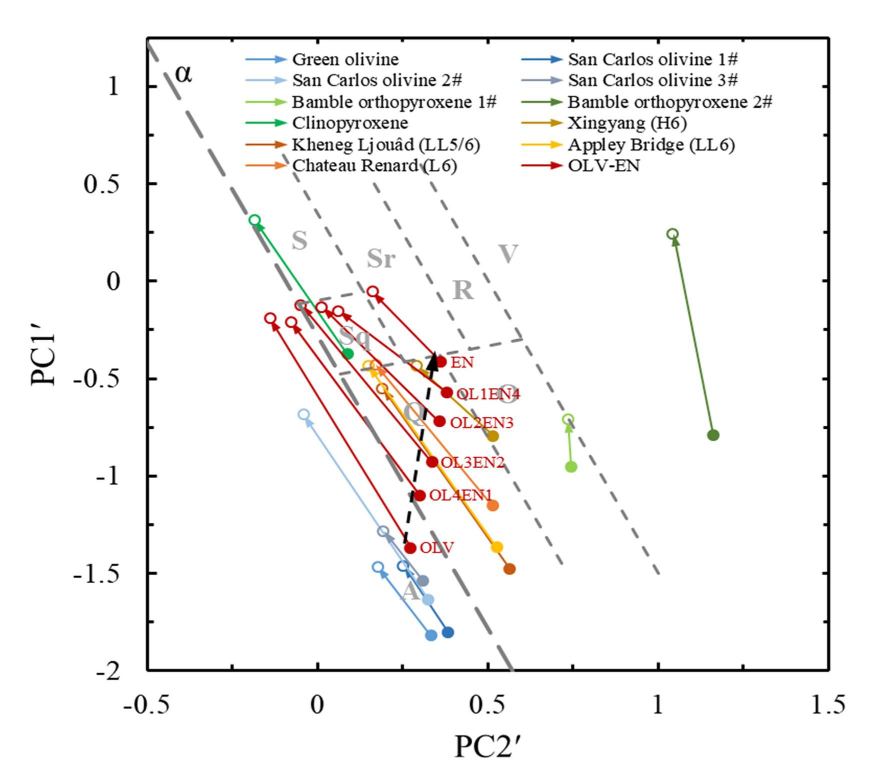


图 4 基于Bus-DeMeo小行星分类法的太空风化趋势图. 实心点为辐照前数据, 空心点为辐照后数据(多次辐照的样品取累计能量最高的数据), 箭头方向为模拟太空风化的效果趋势方向, 黑色虚线指示混合矿物新鲜样品的分布趋势. OLV-EN为6组橄榄石-辉石混合物样品数据. 灰色字母表示“Bus-DeMeo分类法”定义的小行星类型[13].

Fig. 4 Space weathering trend diagram based on the Bus-DeMeo asteroid taxonomy. The solid symbols are the data before irradiation, the open symbols are the data after irradiation (for samples with multiple irradiations, the data with the highest cumulative energy is taken), the arrows indicate the trend direction of simulating space weathering effects, and the black dashed line indicates the distribution trend of unirradiated samples of mixed minerals. OLV-EN consists of six sets of olivine-pyroxene mixture samples. Gray letters represent asteroid types defined by the Bus-DeMeo classification system[13].

图5展示了基于SDSS小行星分类对光谱数据处理得到的太空风化趋势结果[1]. 所有样品经过辐照后都表现为gri - slope增加(变红), z′ - i′增加(1 μm吸收变浅). 混合矿物与陨石的太空风化趋势均呈现出“Q-S”的规律. 辉石数据更靠近V型小行星区域. 但值得注意的是, 橄榄石样品光谱数据与A型小行星区域无法对应: 两者z′ - i′值都集中在−0.2左右, 但gri - slope值分布明显不统一, 大量辐照后的橄榄石落在Q型小行星的分布区域.

4 讨论

4.1 太空风化对小行星光谱的影响

与之前模拟实验相比, 本文收集的数据包含更多的样品种类及不同的辐照条件. 所有样品辐照后均表现出反射率降低、1 μm处可见-近红外连续统斜率变红和吸收特征减弱; 同一样品随激光能量增加变得“更暗”和“更红”. 多次辐照的L6球粒陨石Chateau Renard和橄榄石San Carlos olivine 2#样品, 随着辐照总量的增加, 它们的$\triangle R_{0.55}$变化逐渐减小(反射率降低变慢), 表明太空风化趋于饱和.

大部分样品△BC1非常小(< 10 nm), 表明太空风化不会引起1 μm吸收中心的明显偏移. 同时值得注意的是, 不同样品1 μm吸收中心的偏移方向没有呈现一致规律, 这可能是不同成熟度月壤及硅酸盐小行星表壤1 μm吸收中心不统一的原因[46–47].

部分样品(如Chateau Renard)的1 μm吸收中心向长波方向偏移达到10–15 nm, 可能是由于玻

璃质(一种太空风化产物)加入的原因, 因为含铁玻璃会在长波位置(1.07–1.20 μm)表现出较宽的吸收特征[48–50]. 少数样品(如Kheneg Ljouad)的1 μm吸收中心向短波方向偏移达到10–15 nm, 可能是由于Fe^{2+}从橄榄石结构中解离出来形成了纳米级单质金属铁颗粒(np-Fe0, 另一种太空风化产物)[51]. 这为吸收中心的偏移提供了可能的解释, 但并不影响太空风化对吸收中心影响极弱的认识. 绝大多数样品的1 μm吸收中心的偏移在±10 nm范围内, 10 nm可作为今后研究硅酸盐小行星太空风化1 μm吸收中心偏移的参考值.

“橄榄石-辉石混合体系”经历了相同激光能量辐照后, 纯橄榄石样品的1 μm吸收面积减小87.1%, 纯辉石样品的1 μm吸收面积减小32.1%; 相同能量下, “橄榄石-辉石混合体系”变暗程度随橄榄石比例增加而增大, 支持辉石比橄榄石更抗风化这一结论[52–53]. 因为橄榄石对太空风化的响应比辉石更快, 即橄榄石比例越高的样品变暗更快, 且1 μm波段面积相较于2 μm波段面积衰减更快, 这也是样品在辐照后BAR增加的原因.

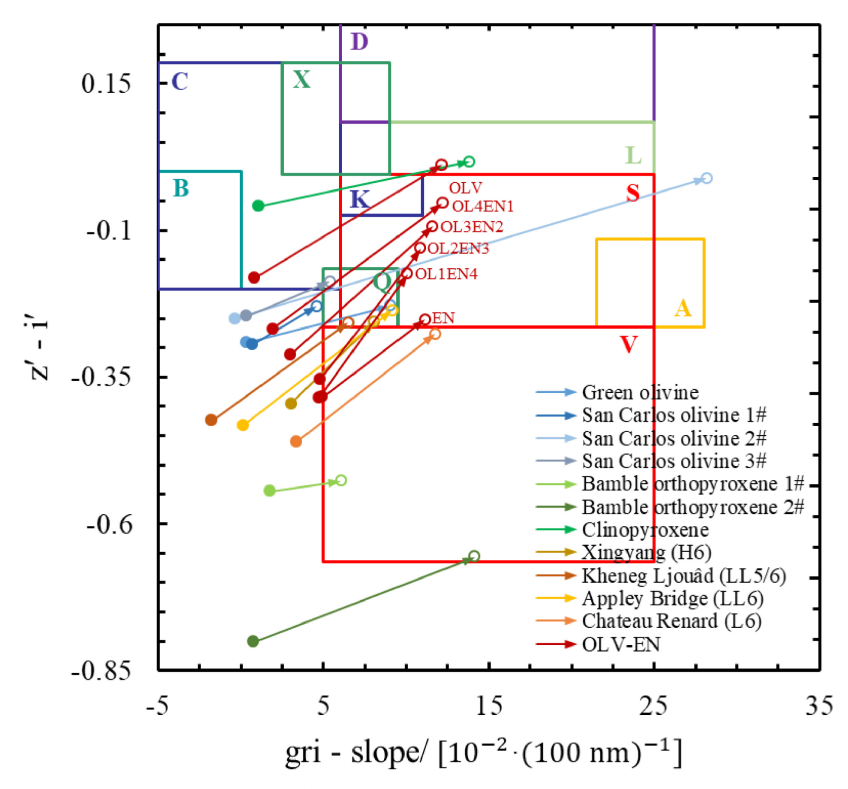


图 5　基于SDSS小行星分类法的太空风化趋势图. 实心点为辐照前数据, 空心点为辐照后数据(多次辐照的样品取累计能量最高的数据), 箭头方向为模拟太空风化的效果趋势方向. OLV-EN为6组橄榄石-辉石混合物样品数据. 方框表示“Bus-DeMeo分类法”定义的小行星类型所在区域[1].

Fig. 5　Space weathering trend diagram based on the SDSS asteroid taxonomy. The solid symbols are the data before irradiation, the open symbols are the data after irradiation (for samples with multiple irradiations, the data with the highest cumulative energy is taken), and the arrows indicate the trend direction of simulating space weathering effects. OLV-EN consists of six sets of olivine-pyroxene mixture samples. The box represents the region where the asteroid types defined by the Bus-Demeo classification system are located[1].

4.2　太空风化对小行星光谱分类的影响

Q型、Sq型、S型小行星均为普通球粒陨石的母体, 但Q型代表较少风化的普通球粒陨石成分, Sq型代表中等风化的普通球粒陨石成分, S型代表高度风化的普通球粒陨石成分[3].

Q型比Sq及S型小行星反照率更高, 光谱斜率

更低且吸收更深[3]. 对于小尺寸的近地小行星, 潮汐拖拽、自旋加速、周期性热循环、陨石/微陨石碰撞等机制驱动的小行星表面更新过程(与太空风化作用相反)更加强烈, 导致S型可重新变为Q型, 这与Q型尺寸较小且多存在于近地区域的观测一致[54]. 图4和图5中混合矿物与陨石的太空风化趋势都表明硅酸盐小行星具有"Q-Sq-S"的风化趋势, 我们的结果支持S型和Q型小行星光谱特征的差异主要与太空风化程度有关的观点[45].

图4中平行于Q型和Sq型小行星分界线的方向可以反映物质组成. 图中左下方区域的光谱具有较深较宽的1 μm吸收带(更富橄榄石), 随PC2′增加越靠近右上方区域光谱1 μm吸收带变窄且有更深更宽的2 μm吸收带(更富辉石), 这意味着这个方向也可反映波段面积的变化. 这为辉石样品太空风化趋势不一致提供了一些可能解释: 受辐照能量和样品本身成分差别的影响, Bamble orthopyroxene 1#和Bamble orthopyroxene 2#样品在辐照前后BA2基本不变, Clinopyroxene和EN样品辐照后BA2明显减小(表2), 因此出现了太空风化趋势箭头的水平分量方向不一致的情况.

OL4EN1样品的太空风化趋势箭头靠近并略微跨越了α线(图4), 这可能是由于辐照后BA2值过小(表2). 前人对Chelyabinsk陨石冲击变暗的研究中也出现了跨越α线的情况[55]. 我们的结果表明橄榄石含量占主导地位的小行星经过足够长时间的太空风化可能出现与冲击变暗类似的效应.

SDSS小行星分类图中A型小行星分布区域与辐照后的橄榄石分布区域不一致(图5), 可能与SDSS数据本身有关. SDSS数据包含大量小行星数据, 但光谱分辨率低、波长范围窄(仅为0.354–0.913 μm). 对于许多小行星类型(特别是L、S、Q、A型), 其波段数据只能指示1 μm吸收特征的存在, 无法准确计算吸收的深度和形状[13], 因此这种分类存在较大的不确定性. 此前也已发现位于Cybele区域的A型小行星(11616) 1996 BQ2由于斜率较低(gri - slope值为1.98, z′ - i′值为−0.15), 无法被准确分类至A型小行星区域[56], 这与我们的样本辐照结果类似. 因此, 基于SDSS的小行星分类可能导致A型小行星数量被低估, 部分A型小行星可能被误划分为Q型小行星.

5 结论

本文通过分析陨石、单矿物和混合矿物样品激光辐照实验数据, 并对比小行星光谱分类数据, 研究了太空风化对硅酸盐小行星反射光谱的改造过程. 主要结论有:

(1)太空风化不会引起1 μm吸收中心明显偏移, 偏移量基本保持在±10 nm范围内, 这为太空风化对硅酸盐小行星光谱吸收中心波动提供了参考;

(2)橄榄石的抗风化能力比辉石弱, 太空风化会导致BAR增加, 但对整体矿物学分类影响较小;

(3)在主成分分析图中, A型小行星具有几乎平行于α线的风化趋势, 其余硅酸盐小行星具有"Q-Sq-S"的风化趋势, 橄榄石占主导的小行星经历足够长时间的太空风化之后可能跨越α线;

(4)基于SDSS数据的小行星分类系统可能造成A型小行星的数量被低估, 并与Q型小行星相混淆.

详细分析不同矿物组成的硅酸盐小行星受太空风化光谱改造效应, 对小行星遥感数据的准确解译具有重要的意义. 本文可为小行星在太阳系的物质分布、表面演化历史及机制以及我国的小行星探测任务等提供支撑.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议.

参 考 文 献

[1] DeMeo F E, Carry B. Icarus, 2013, 226: 723
[2] DeMeo F E, Carry B. Nature, 2014, 505: 629
[3] Binzel R P, DeMeo F E, Turtelboom E V, et al. Icarus, 2019, 324: 41
[4] Zellner B, Tholen D J, Tedesco E F. Icarus, 1985, 61: 355
[5] Bell J F, Owensby P D, Hawke B R, et al. LPSC, 1988, 19: 57
[6] Xu S, Binzel R P, Burbine T H, et al. Icarus, 1995, 115: 1
[7] Clark B E, Bell J F, Fanale F P, et al. Icarus, 1995, 113: 387
[8] Carvano J M, Hasselmann P H, Lazzaro D, et al. A&A, 2010, 510: A43
[9] Chapman C R, Morrison D, Zellner B. Icarus, 1975, 25: 104

[10] Tholen D J. Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry. Tucson: University of Arizona, 1984: 54
[11] Bus S J, Binzel R P. Icarus, 2002, 158: 106
[12] Bus S J, Binzel R P. Icarus, 2002, 158: 146
[13] DeMeo F E, Binzel R P, Slivan S M, et al. Icarus, 2009, 202: 160
[14] Mahlke M, Carry B, Mattei P A. A&A, 2022, 665: A26
[15] Cloutis E A, Binzel R P, Gaffey M J. Eleme, 2014, 10: 25
[16] DeMeo F E, Burt B J, Marsset M, et al. Icarus, 2022, 380: 114971
[17] Hapke B. JGRE, 2001, 106: 10039
[18] Pieters C M, Noble S K. JGRE, 2016, 121: 1865
[19] Noble S K, Pieters C M, Keller L P. Icarus, 2007, 192: 629
[20] Lucey P G, Noble S K. Icarus, 2008, 197: 348
[21] Abe M, Takagi Y, Kitazato K, et al. Science, 2006, 312: 1334
[22] Hiroi T, Abe M, Kitazato K, et al. Nature, 2006, 443: 56
[23] Ishiguro M, Hiroi T, Tholen D J, et al. M&PS, 2007, 42: 1791
[24] Pieters C M, Ammannito E, Blewett D T, et al. Nature, 2012, 491: 79
[25] Arakawa M, Saiki T, Wada K, et al. Science, 2020, 368: 67
[26] Lauretta D S, Adam C D, Allen A J, et al. Science, 2022, 377: 285
[27] Lantz C, Brunetto R, Barucci M A, et al. Icarus, 2017, 285: 43
[28] Lantz C, Binzel R P, DeMeo F E. Icarus, 2018, 302: 10
[29] Thompson M S, Morris R V, Clemett S J, et al. Icarus, 2020, 346: 113775
[30] Matsuoka M, Nakamura T, Hiroi T, et al. ApJ, 2020, 890: L23
[31] Zhang P, Tai K, Li Y, et al. A&A, 2022, 659: A78
[32] 周婷, 唐红, 缪秉魁, 等. 空间科学学报, 2023, 43: 647
[33] Wu Y Z, Wang Z C, Lu Y. RAA, 2019, 19: 051
[34] Hasegawa S, DeMeo F E, Marsset M, et al. ApJ, 2022, 939: L9
[35] Vernazza P, Binzel R P, Rossi A, et al. Nature, 2009, 458: 993
[36] Sasaki S, Nakamura K, Hamabe Y, et al. Nature, 2001, 410: 555
[37] Brunetto R, Strazzulla G. Icarus, 2005, 265: 273
[38] Sasaki S, Kurahashi E, Yamanaka C, et al. AdSpR, 2003, 31: 2537
[39] Weber I, Stojic A N, Morlok A, et al. E&PSL, 2020, 530: 115884
[40] Brunetto R, Romano F, Blanco A, et al. Icarus, 2006, 180: 546
[41] Han H J, Lu X P, Jiang T, et al. RAA, 2021, 21: 127
[42] Lindsay S S, Marchis F, Emery J P, et al. Icarus, 2015, 247: 53
[43] Nesvorny D, Jedicke R, Whiteley R J, et al. Icarus, 2005, 173: 132
[44] Dunn T L, McCoy T J, Sunshine J M, et al. Icarus, 2010, 208: 789
[45] Marchi S, Brunetto R, Magrin S, et al. A&A, 2005, 443: 769
[46] Taylor L A, Pieters C M, Keller L P, et al. JGRE, 2001, 106: 27985
[47] Noble S K, Pieters C M, Hiroi T, et al. JGRE, 2006, 111: E11
[48] Adams J B. JGRE, 1974, 79: 4829
[49] Minitti M E, Mustard J F, Rutherford M J. JGRE, 2002, 107: E5
[50] Horgan B H, Cloutis E A, Mann P, et al. Icarus, 2014, 234: 132
[51] Kohout T, Čuda J, Filip J, et al. Icarus, 2014, 237: 75
[52] Chrbolková K, Brunetto R, Ďurech J, et al. A&A, 2021, 654: A143
[53] Chrbolková K, Halodová P, Kohout T, et al. A&A, 2022, 665: A14
[54] DeMeo F E, Marsset M, Polishook D, et al. Icarus, 2023, 389: 115264
[55] Kohout T, Penttilä, Mann P, et al. PSJ, 2020, 1: 37
[56] DeMeo F E, Polishook D, Carry B, et al. Icarus, 2019, 322: 13

The Influence of Space Weathering on the Reflectance Spectra of Silicate Asteroids

ZHANG Qin-wei[1,2] ZHANG Peng-fei[3] WANG Peng-yue[4] JIANG Te[5] LU Yu[1]
HAN Hui-jie[4] PANG Rong-hua[3] LI Yang[3] ZHANG Hao[5] JIN Yan[6] WU Yun-zhao[1,4]

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)
(3 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081)
(4 State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078)
(5 Planetary Science Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074)
(6 Earth Observation System and Data Center, China National Space Administration, Beijing 100101)

Abstract Research on space weathering is of great significance for the remote sensing inversion of the surface environment and composition of asteroids. Currently, the research results on the spectral changes of asteroids caused by space weathering are not consistent, and there is a lack of systematic understanding of the weathering models of silicate asteroids. In this study, based on the idea of large-sample research, laser irradiation experiments were conducted on 4 ordinary chondrites (H, L, and LL types), 7 types of silicate minerals, and 6 groups of olivine-pyroxene mixtures with different proportions. The visible-near-infrared reflectance spectra (0.45–2.5 μm) of the samples before and after laser experiments were analyzed, and the impact of space weathering on the reflectance spectra of silicate asteroids was studied in combination with the spectral classification of asteroids. Our results showed that space weathering can increase the band area ratio, but it does not cause a significant shift in the 1 μm absorption center. The use of the "1 μm absorption center - band area ratio" diagram is still effective in distinguishing different types of meteorites. Moreover, space weathering has little impact on overall mineralogical classification. In the principal component analysis plot, A-type asteroids have a space weathering trend almost parallel to the α line, while the rest of the silicate asteroids have a "Q-Sq-S" space weathering trend. The asteroid classification system based on Sloan Digital Sky Survey (SDSS) data may confuse the classification of olivine-rich asteroids and may underestimate the number of A-type asteroids. This study systematically analyzed the weathering models and spectral changes of silicate asteroids, which is scientifically significant for a better understanding of the space weathering effect on asteroid spectra and has practical value for remote sensing quantitative inversion.

Key words planets and satellites: surfaces, moon, asteroids: general